

Integrierte Bewertung von Steuerungssystemen auf dem Weg zum automatisierten Bahnbetrieb

An integrated evaluation of train control systems on the path to automated train operations

Leander Flamm | Benedikt Scheier

Die Automatisierung des Bahnbetriebs verspricht Steigerungen der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Schienenverkehrs. Wie aber kann die Automatisierung wirtschaftlich umgesetzt werden? Sind erst bei einer vollständigen Automatisierung Vorteile realisierbar, oder können auch Zwischenschritte bereits gewinnbringend umgesetzt werden? Das DLR hat technologische Szenarien definiert und diese gesamtheitlich hinsichtlich Veränderungen für die Leistungsfähigkeit, die Wirtschaftlichkeit und für Maßnahmen im Störfall im Vergleich zum Status Quo untersucht.

1 Ausgangslage

Der Schienenverkehr in Europa steht vor großen Herausforderungen. Auf der einen Seite leidet die Betriebsqualität bereits heute stark unter der Überlastung wichtiger Korridore und für die kommenden Jahre werden noch weitere Steigerungen des Verkehrsaufkommens prognostiziert [1]. Währenddessen hat die Länge des Streckennetzes in den letzten Jahrzehnten stetig abgenommen und stagniert mangels ambitionierter Neubauvorhaben weiterhin (Bild 1).

Auf der anderen Seite sind schwach frequentierte Nebenstrecken angesichts steigender Kosten der Sicherungstechnik und für die Personalgewinnung immer schwieriger wirtschaftlich zu betreiben. Politisch wird aber eine langfristige Beibehaltung oder gar ein Ausbau des Zugbetriebs angestrebt. Angesichts langfristig sinkender Bevölkerungszahlen wird sich die Personalproblematik dabei noch weiter verstärken.

Große Hoffnungen für die Lösung dieser Probleme werden in die Automatisierung der Fahrzeugsteuerung gesetzt. Es werden Leistungssteigerungen durch eine präzisere Fahrweise entlang optimierter Fahrzeiten und ein weniger personalintensiver Betrieb erwartet. Doch wie steht es um die Wirtschaftlichkeit der momentan diskutierten Ansätze, die meist eine Automatic Train Operation (ATO) aufbauend auf dem European Train Control System (ETCS) vorsehen?

Die derzeitige Entwicklung des ETCS ist so angelegt, dass es alle Gegebenheiten des Bahnbetriebs in Europa abdecken kann. Es ist daher gerade für einfache Streckensituationen, wie sie beispielsweise auf eingleisigen Nebenbahnen mit einfachen Kreuzungsbahnhöfen und wenig Zugbetrieb vorliegen, überdimensioniert und (noch) nicht wirtschaftlich einzuführen. Für bisher verfolgte Technologien zur Automatisierung des Zugbetriebs ist jedoch eine linienförmige Überwachung, wie sie ETCS Level 2 oder 3 bieten können, zwingend notwendig.

The automation of train operations promises to boost the performance and reliability of rail traffic. However, how can automation be realised economically? Do the benefits become available in the intermediate stages or only once the automated system has been fully implemented? The DLR has defined technological scenarios and evaluated them holistically with regard to the developments in line capacity and profitability and the measures used to deal with failures in comparison with the status quo.

1 The motivation

Rail transport in Europe is facing significant challenges. On the one hand, operational quality is suffering due to the congestion of important corridors, while further increases in transport demand are projected for the near future [1]. At the same time, the network length has decreased and continues to stagnate due to unambitious plans for further development (fig. 1).

On the other hand, poorly frequented regional branch lines are facing rising costs for signalling and safety systems as well as growing problems in finding personnel, all of which makes economical operations increasingly difficult. However, political efforts are being made to ensure the long-term preservation or even the expansion of rail services. Finding staff will become increasingly more difficult, however, due to the slowly falling population numbers.

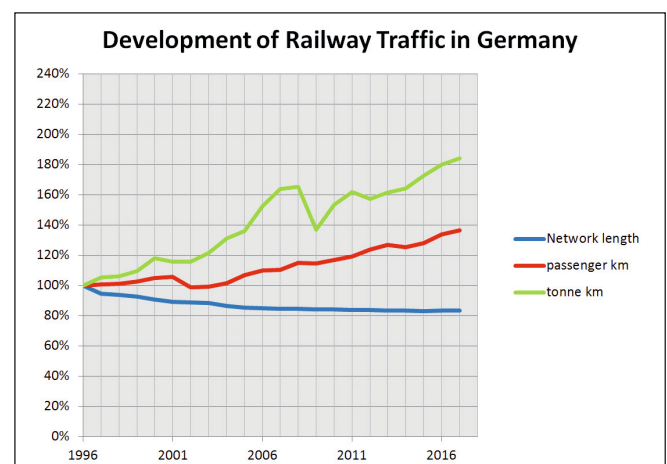


Bild 1: Entwicklung von Verkehrsleistung und Netzlänge des Schienenverkehrs in Deutschland [2, 3]

Fig. 1: The development of railway transportation performance and network length in Germany [2, 3]

In diesem Artikel sollen daher – mit Fokus auf den Betrieb von regionalen Bahnstrecken mit wenig Verkehr – sowohl Automatisierungen mit ETCS als auch ein alternatives Szenario betrachtet werden. Dafür wird die Sicherungslogik stark vereinfacht und auf die Fahrzeugseite verlagert, um eine kostengünstige Umsetzung der Automatisierung zu ermöglichen. Hierbei soll die Kompatibilität zu ETCS bestehen bleiben, indem auf standardisierten Komponenten aufgebaut und eine soweit möglich ähnliche sicherungstechnische Logik verwendet wird.

Zusammen mit der Veröffentlichung in [4] wird die integrierte Bewertung von neuen Technologien am Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) vorgestellt, die eine umfassende Betrachtung von technischen Rahmenbedingungen, betrieblichen Auswirkungen, Lebenszykluskosten und dem Verhalten von Mensch-Maschine-Interaktionen im Störfall ermöglicht.

2 Integrierte Bewertung

Um verschiedene technologische Realisierungen der Automatisierung untereinander und mit möglichen Infrastrukturausbauten für den manuellen Zugbetrieb vergleichen zu können, werden sechs Szenarien definiert und insbesondere im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit untersucht. In [4] wurden bereits technische Anforderungen, betriebliche Auswirkungen und betroffene Regelwerkspassagen beschrieben. Zur besseren Übersicht werden die betrieblichen Chancen in diesem Kapitel kurz zusammengefasst. Abschließend wird ein Ausblick auf die Bewertung von Störungsbehandlungen gegeben.

2.1 Definition der Szenarien

Für die zu betrachtenden Szenarien wird eine generische Regionalbahnstrecke definiert, die kurz vor einem größeren Knotenbahnhof in eine zweigleisige Hauptstrecke mündet. Die Strecke

There are high hopes for the automation of train operations in order to solve these problems. Rail transport companies are expecting both an increase in line capacities due to more precise driving and a reduction in the required staff. But what will be the economic consequences of the currently discussed approaches, mainly using Automatic Train Operation (ATO) based on the European Train Control System (ETCS)?

The current development of ETCS is focused on covering nearly all the eventualities in European railway operations. When dealing with simple conditions, such as those found on single-track branch lines with basic passing stations and limited train movements, this leads to oversized and (as yet) uneconomically viable technological solutions. However, continuous supervision comparable to ETCS level 2 or 3 is stringently required for most automation technologies. In this article, we have therefore considered automation solutions using ETCS and an alternative scenario with a focus on the operation of regional branch lines. The signalling logic has been simplified and shifted from the infrastructure onto the vehicle in this second approach in order to enable the cost-effective implementation of the automation solutions. The compatibility with ETCS should still be ensured by means of the greatest possible use of standardised components and a similar logic.

The integrated evaluation of new technologies undertaken at the German Aerospace Center's (DLR) Institute of Transportation Systems is being introduced here along with the publication in [4]. The used methodologies have allowed us to comprehensively assess the technical conditions, the operational impacts, the life cycle costs and the execution of human-machine interactions in the case of failure.

2 The integrated evaluation

We have defined six scenarios and examined them with a focus on their economic viability in order to be able to compare the different technological implementations of automation systems

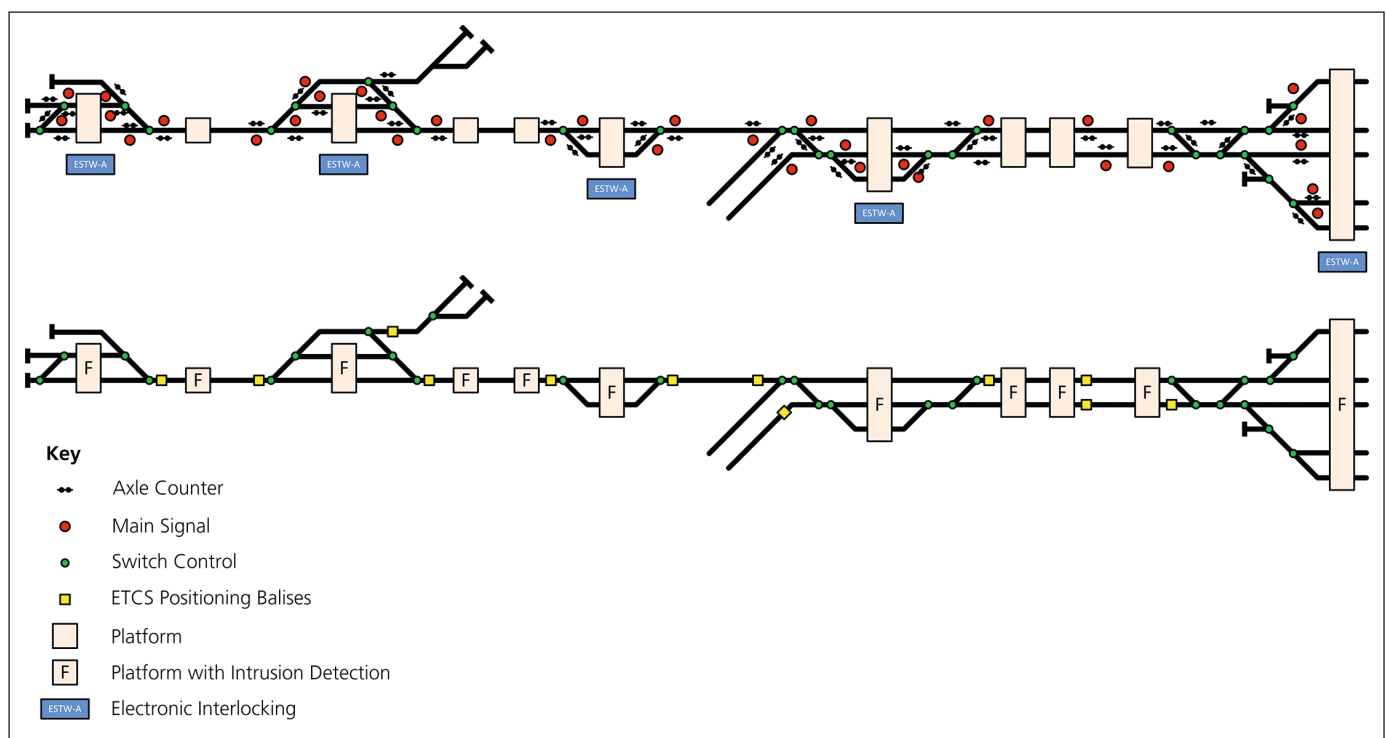


Bild 2: Infrastruktur der untersuchten Regionalbahnstrecke im Szenario PZB (oben) und im Szenario ETCS AUT (unten)

Fig. 2: The infrastructure for the evaluated branch lines in the PZB (top) and ETCS AUT (bottom) scenarios

Bezeichnung	Fahraufgabe	Beschreibung	Fahrwegsteuerung
1 PZB	Manuell	Istzustand mit klassischer Ausrüstung von Strecke und Fahrzeug mit PZB	Stellwerk
2 ETCS L2oS	Manuell	Betrieb in ETCS Level 2 ohne Streckensignale	Stellwerk
3 ETCS L2oS ATO	Automatisch	Betrieb von ATO over ETCS mit ETCS Level 2 ohne Streckensignale	Stellwerk
4 ETCS L3	Manuell	Betrieb im Moving Block mit ETCS Level 3	Stellwerk
5 ETCS L3 ATO	Automatisch	Betrieb von ATO over ETCS mit ETCS Level 3	Stellwerk
6 ETCS AUT	Automatisch	Vereinfachte Betriebsführung auf Nebenstrecken im autonomen Betrieb von Fahrzeugen	Fahrwege werden von den Fahrzeugen eingestellt und überwacht, ein übergeordnetes Stellwerk entfällt

Tab. 1: Übersicht über die untersuchten Szenarien

mit einer Länge von 50 km wird von insgesamt drei Triebzügen im Halbstundentakt befahren. Die Infrastruktur des Szenarios ist in Bild 2 dargestellt. Eine genaue Beschreibung der Infrastrukturkomponenten ist in [5] zu finden.

Als Istzustand wird eine einfache Ausrüstung mit punktförmiger Zugbeeinflussung (PZB) angenommen. Aufbauend darauf wird ein Betrieb mit ETCS Level 2 ohne Streckensignale (oS) und ETCS Level 3 mit Moving Block [6], jeweils mit automatisiertem und manuellem Zugbetrieb, untersucht. Als letztes Szenario wird ein Modus „ETCS AUT“ definiert, bei dem die Sicherungslogik nahezu vollständig in das Fahrzeug verlagert wird und auch die Ansteuerung des Fahrwegs vom Fahrzeug aus erfolgt.

Die Fahrwegfreimeldung erfolgt über eine Kommunikation mit anderen Fahrzeugen, einem vereinfachten Radio Block Centre (RBC), das die Fahrzeugpositionen im Störfall überwacht, und über eine optische oder radargestützte Objekterkennung vor dem Fahrzeug. Fahrwegreservierungen (Movement Authority, MA) werden zwischen den Fahrzeugen, die über einen Streckenatlas verfügen, ausgehandelt. Weichen werden über Funk direkt vom Fahrzeug angesteuert und senden umgekehrt die Verschlussbestätigung zurück an das Fahrzeug. Die Lokalisierung des Fahrzeugs kann über Sensordatenfusion aus Satellitennavigation, Odometrie und Beschleunigungsmessungen, aber auch über Festdatenbalisen realisiert werden. Insgesamt ist eine vollständige Abwärtskompatibilität zu ETCS Level 1, 2 und 3 gegeben. Entscheidend ist der Entfall einer infrastruktureitigen Fahrwegsicherung, Stellwerke werden nicht mehr benötigt. Angesichts der hohen Infrastrukturkosten für sehr wenig Zugbetrieb in Varianten mit infrastruktureitiger Fahrwegsicherung kann dieser Ansatz trotz der hohen Kosten der Fahrzeugausrüstung auf schwach frequentierten Nebenstrecken potenziell interessant sein. Die sechs untersuchten Szenarien sind in Tab. 1 beschrieben.

Zur Unterscheidung der grundsätzlichen Ansätze wird das Szenario 6 als „autonomes“ Fahren bezeichnet, da sich ein Fahrzeug tatsächlich selbstständig den Fahrweg stellt und sichert und sich somit autonom auf dem Netz bewegen kann. Im Gegensatz dazu werden auf Systeme, die weiterhin eine infrastruktureitige Fahrwegsteuerung und -sicherung vorsehen, als maximal „vollautomatisiert“ bezeichnet, da Fahrzeuge in diesen Szenarien auf die korrekte Einstellung des Fahrwegs von außen angewiesen sind, um zu ihrem Ziel zu gelangen.

2.2 Betriebliche Chancen

Es ist festzustellen, dass auf eingleisigen Strecken mit vertaktetem Personenverkehr keine leistungssteigernden Effekte der Automatisierung zu erwarten sind. Die Zugfolge ist, wenn im Taktverkehr abwechselnd aus beiden Richtungen Züge fahren, durch den Abstand der Kreuzungsbahnhöfe fest bestimmt. Der minimal fahrbare Takt ergibt sich aus der Zeit, die ein Zug der Hinrichtung benötigt, und der Zeit, die ein folgender Zug der Rückrichtung benötigt, bevor erneut ein Zug der Hinrichtung verkehren kann. Dieser Takt

with each other and also with infrastructural investments without any automation. The related technical requirements, operating ramifications and necessary changes in the regulations have been analysed in [4]. We have summarised the operating possibilities for automation technologies in this chapter in order to provide a better overview. In conclusion, we have also provided a view of the evaluation of different failure rectification tactics.

2.1 The definition of the scenario

The examined scenarios are based on a generic branch line, which branches off from a double-track main line near a larger junction station into a single track and ends at a small terminus station. The 50 km long line is served by three multiple units running every 30 minutes. Fig. 2 shows the branch line's infrastructure. A more detailed description of all the infrastructure components can be found in [5].

We have taken a simple installation with intermittent automatic train control (PZB) as the reference point. Based on this, we have examined the operations with ETCS L2 without lineside signals (ETCS L2oS, not to be confused with the OS “On Sight” operating mode) and ETCS L3 [6], each with both manual and automatic train operations. We have defined a new “ETCS AUT” mode with the almost complete relocation of the signalling logic onto the vehicle, which in turn also realises the changing of the points, for the last scenario.

The route clearance is realised by means of direct communication with other vehicles using a simplified Radio Block Centre (RBC), which monitors vehicle positions in the case of failures, and with optical or radar-based object recognition in front of the vehicle. Movement Authorities (MA) are negotiated between the individual vehicles, which are equipped with a digital map for this purpose. The points are changed directly from the vehicle via radio and they send confirmation of their locking state back to the vehicle. The sufficiently precise localisation of the vehicles can be achieved using a sensor data fusion from satellite navigation, odometers and accelerometers complemented by fixed data balises, if necessary. In general, there is full downward compatibility with ETCS levels 1, 2 and 3. The elimination of the signalling and interlocking infrastructure is crucial for the further assessment. As signalling costs increase, this approach can be of interest in cases where few vehicles operate on a large infrastructure despite the high estimated costs of vehicle equipment and authorisation. Tab. 1 describes the six examined scenarios.

In order to be able to differentiate between the different automation approaches, we labelled scenario 6 as “autonomous” driving because the vehicles can in fact control and secure their paths independently, thus driving autonomously in the network. By contrast, existing systems which still rely on the infrastructure directing and securing the vehicles are therefore labelled as “fully automatic”, as the vehicles in this scenario are instructed from outside as to the correct route adjustment in order to reach their destination.

Name	Train operation	Description	Interlocking
1 PZB	manual	Current state with trains and infrastructure equipped with PZB	signal box
2 ETCS L2oS	manual	Operation with ETCS level 2 without signals	signal box
3 ETCS L2oS ATO	automatic	Operation with ATO over ETCS level 2 without signals	signal box
4 ETCS L3	manual	Operation with moving block in ETCS level 3	signal box
5 ETCS L3 ATO	automatic	Operation with ATO over ETCS level 3	signal box
6 ETCS AUT	automatic	Simplified operation of autonomous trains on branch lines	vehicle

Tab. 1: An overview of the evaluated scenarios

kann nur durch eine veränderte Fahrzeit auf dem eingleisigen Streckenabschnitt, beispielsweise durch eine Erhöhung der Streckengeschwindigkeit, geändert werden. Durch die Automatisierung können höchstens verbesserte Umlaufzeiten der Züge durch entfallende Pausenzeiten erzielt werden, wobei die Wendezeiten der Züge in Form von Pufferzeiten oft zur Durchführung eines stabilen Betriebs benötigt werden. In den betrachteten Szenarien werden daher keine Leistungsfähigkeitseffekte angenommen.

Anders ist die Situation auf zweigleisigen Strecken, wo die Zugfolge maßgeblich durch die Blockteilung der Strecke beeinflusst wird und im Allgemeinen größer ist, als es physikalisch notwendig wäre. In [7] wurde für eine S-Bahnstammstrecke eine Leistungssteigerung durch einen Betrieb im Moving Block von bis zu 21 % mehr Zugfahrten pro Stunde im Vergleich zu PZB-Systemen dargestellt, wobei die Infrastruktur auch für diese Zugzahlen ausgebaut sein muss und keine zusätzlichen Konfliktpunkte wie höhengleiche Kreuzungen oder ungünstige Fahrstraßenausschlüsse besitzen darf. Auch kann ein Großteil der Leistungssteigerung bereits heute durch linienförmige Zugsicherungen (LZB) oder die Einführung von Zwischenblöcken innerhalb von Stationen erreicht werden, sodass die Verbesserungen auf bereits entsprechend ausgerüsteten Strecken bedeutend kleiner ausfallen. Zudem ist es wichtig zu betonen, dass diese Effekte zum überwiegenden Teil durch den Verkehr im Moving Block [8] erzielt werden, welcher grundsätzlich auch ohne vollständige Automatisierung durchführbar ist. Die Automatisierung führt nur zu kleinen Änderungen durch eine etwas präzisere Fahrweise und die bessere Ausnutzung von Bremskurven.

Auch ist zu erwarten, dass im Mischverkehr von Personen- und Güterzügen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Halteregeimen durch Moving Block ein flexiblerer Betrieb ermöglicht wird, da harte Blockgrenzen entfallen und dadurch in einigen Fällen ein Anhalten von folgenden Zügen zugunsten einer langsamen Weiterfahrt vermieden werden kann. Auch bei Überholungen können kürzere zeitliche Abstände erzielt werden. Die Automatisierung kann hier vorrangig helfen, komplexe und häufig wechselnde Geschwindigkeitsvorgaben einzuhalten.

Im Zusammenspiel von Automatisierung und Moving Block ist es auch denkbar, dass in komplexen Knotenbahnhöfen Fahrstraßen nicht mehr fest zwischen zwei definierten Punkten eingestellt werden, sondern dynamisch entsprechend dem freien Fahrweg auch bis zu virtuellen Punkten mitten im Gleisvorfeld. Eine entsprechende Logik zur Vermeidung von Deadlock-Situationen vorausgesetzt, könnten so Behinderungen durch Fahrstraßenausschlüsse stark verringert werden. Zusätzlich könnten durch verringerte oder ganz entfallende Durchrutschwege viele Fahrstraßenausschlüsse direkt vermieden werden.

2.3 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Für jedes der sechs Szenarien werden die Lebenszykluskosten berechnet und mit der Kapitalwertmethode auf den Zeitpunkt des

2.2 The opportunities for railway operations

It has to be noted that single-track lines with periodic passenger services will most likely not increase their capacity through automation. In the case of trains which run alternately in both directions, the headway is given by the distance between the passing stations. The minimum headway amounts to the time it takes one train to travel the distance between the stations plus the time it takes the next train to go in the opposite direction. A train can only travel in the first direction again after the second train has arrived. This period can only be shortened by changing the travel times in the single-track section, i. e. by increasing the maximum permitted speeds on the line. Only slight improvements in turnaround times can be achieved with automation due to the omitted pause times. Even then, the turning times are often used as buffer times to stabilise operations and they cannot be reduced. We therefore do not anticipate any capacity improvements in the examined scenarios.

By contrast, the headway on double-track sections is mostly limited by the distances in the section signalling and it is commonly bigger than is physically necessary. The study in [7] shows a possible capacity improvement on a simple urban trunk line of up to 21 % more trains per hour, if the signalling is changed from PZB to an automated Moving Block system. It has to be noted though that this requires adequate infrastructure which does not introduce additional points of conflict into the system, such as at-grade junctions or time-consuming route exclusions. In addition, a large part of the capacity improvements could already be realised using continuous automatic train protection such as LZB or by installing multiple intermediate block signals inside the stations. Therefore, the real improvements on existing lines could be substantially smaller. We also want to emphasise the fact that most of these effects have to be attributed to the use of Moving Block (i. e. not to the automation in itself), which could technically also be realised using manual train operations. The effects of the automation are limited to a slightly more precise driving behaviour and the better use of braking trajectories. It can be further assumed that Moving Block will enable more flexible operations in mixed passenger and freight train traffic with differing speeds and stops. Static section signalling can be avoided so that full stops of consecutive trains can often be reduced to phases of slowly approaching the next train. Likewise, passing movements can also be realised with reduced spatial buffers and therefore within shorter timeframes. Automation could help in controlling trains with high accuracy under complex and frequently changing speed restrictions.

When combining automation and Moving Block, routes could conceivably be reduced from static connections between two signals to dynamically determined paths between virtual points anywhere in the track array as needed for the braking distance. This could help to reduce conflicts caused by route exclusions in complex junction stations, provided deadlock situations can

Investitionsbeginns abgezinst. Es werden Kosten für Anschaffung und Installation / Einbau und Inbetriebsetzung betrachtet (CapEx = Capital Expenditure). Des Weiteren werden Besitzkosten (Personal, Instandhaltung) inklusive der Lebensdauer und möglicher Reinvestitionskosten über eine Zeitdauer von 40 Jahren berücksichtigt (OpEx = Operational Expenditure). Der Vergleich der Kosten bezieht sich ausschließlich auf Kostenelemente, die für Fahrwegsteuerung, Zugsteuerung und Zugsicherung benötigt werden. Die Zuweisung der Elemente jeweilig zu den Szenarien ist der Tab. 2 zu entnehmen.

Das Mengengerüst für Streckensignale, Weichen und Züge ergibt sich aus den Szenarien. Längen für Kabel und Kabeltrassen werden anhand der Streckentopologie berechnet. Das Wertegerüst (Kostensätze) ergibt sich aus verschiedenen Quellen (u. a. [9]) oder es müssen sinnvolle Annahmen getroffen werden, wenn noch keine Erfahrungswerte für Kostenpositionen vorliegen. Insbesondere die Annahmen für Technologien des ATO und des autonomen dezentralen Bahnverkehrs sind mit Unsicherheiten behaftet. Liegen den Autoren keine genauen Werte für die Besitzkosten vor, so wird für diese Kosten jährlich eine Höhe von 1,5 % der CapEx angenommen. Einen zusätzlichen Kostenpunkt in den Automatisierungsszenarien bildet der Train Operator (siehe Abschnitt 2.4), der eine manuelle Rückfallebene im Störfall darstellt.

be avoided using appropriate algorithms. In addition, reduced or fully eliminated overlaps could also avoid some route exclusions altogether.

2.3 The profitability analysis

We have calculated the life cycle costs for each of the six scenarios and discounted them to the moment of the start of the investments using the net present value method. We have considered the acquisition and installation costs as well as the commissioning (CapEx = Capital Expenditure). Furthermore, ownership costs (staff and maintenance costs) over the lifetime along with possible reinvestments over 40 years have also had to be factored in (OpEx = Operational Expenditure). We have only compared the cost elements directly linked to the interlocking system, the train control and the train protection. Tab. 2 shows the allocation of the cost elements to their respective scenarios.

The quantity structure of the track signalling, the points and the trains has been defined on the basis of the scenarios. The length of the cables and the cable trays has been calculated using the track topologies. The cost rates have been taken from various sources (including [9]) for the known components. We have had to make substantiated assumptions in those cases where no empirical values were available. This mainly involved ATO technologies and decentralised interlocking components. We assumed

			KS-System PZB	ETCS L2 oS	ETCS L2 oS ATO	ETCS L3	ETCS L3 ATO	ETCS AUT
Infrastructure Manager	Route Control	Electronic Interlocking	x	x	x	x	x	
		Switch Control (EW 760 / 1200)	x	x	x	x	x	
		Cable System	x	x	x	x	x	
		Switch Control with Data Comm.						x
		Platform Intrusion Detection System						x
	Train Control	PZB	x					
		Lineside Signalling	x					
		Axle Counter	x	x	x			
	Train Control Op.	Train Control Operator	x	x		x		
	ETCS	Radio-Block-Center		x	x	x	x	x
		ETCS Positioning Balises		x	x	x	x	x
	GSM-R	GSM-R Radio Comm.	x					
		GSM-R Data Comm.		x	x	x	x	x
Railway Undertaking	Train Control	PZB-On-Board Equipment	x					
		ETCS-On-Board Equipment		x	x	x	x	x
		Autonomous Route and Train Control						x
	Automatic Train Operation	ETCS-OBUE Upgrade ATO			x		x	x
		Object Detection: Track			x		x	x
		Object Detection: Doors			x		x	x
	Train Cabin	Train Cabin	x	x		x		
		Emergency Train Cabin			x		x	x
	Train Driver	Train Driver	x	x		x		
	Train Operator incl. Train Operation Station	Train Operator			x		x	x
		Train Operator Station			x		x	x

Tab. 2: Kostenelemente je Szenario

Tab. 2: The cost elements for each scenario

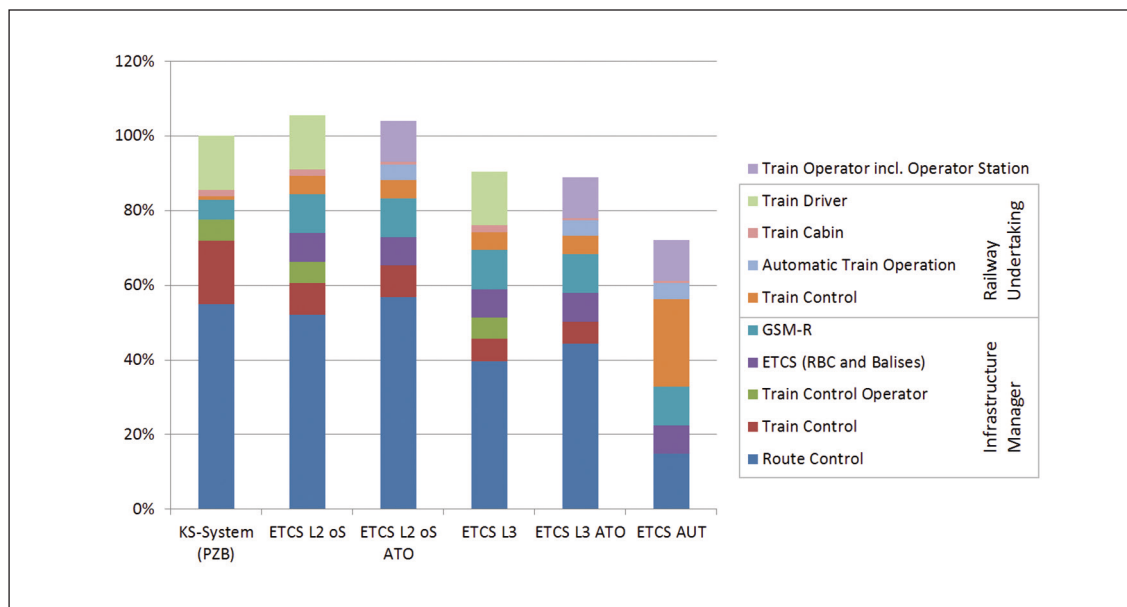


Bild 3: Kostenveränderung in den untersuchten Szenarien

Fig. 3: The cost variations in the evaluated scenarios

Aufgrund der vielen notwendigen Annahmen ist die Summe der Kapitalwerte weniger von Interesse als die prozentualen Verschiebungen der Kosten zwischen den jeweiligen Szenarien:

- Ab dem Szenario ETCS L2oS werden GSM-R mit Datenfunkfunktionalität und ETCS-Elemente benötigt.
- Die Allokation der Zugsicherungsfunktionalität geht immer mehr von der Strecke auf die Züge über. Die Kostenhöhe ist daher auch stark vom Verhältnis der benötigten Infrastrukturelemente zu den auszustattenden Zügen geprägt.
- Die Szenarien mit automatisiertem Bahnverkehr haben keinen finanziellen Aufwand mehr für Triebfahrzeugführer (Tf) und Fahrdienstleiter (Fdl), dafür kommen Kosten für den Train Operator inklusive eines Bedienplatzes hinzu. Der Train Operator übernimmt die Aufgaben des Tf und Fdl.
- Das Szenario ETCS AUT hat im Wertegerüst die höchsten Unsicherheiten, da fast ausschließlich mit Annahmen gerechnet werden muss. Durch das dezentrale Prinzip der Zugsicherung auf und zwischen den Zügen liegen auch entsprechend viele Kosten auf Seiten der Verkehrsunternehmen.

Im untersuchten Fall einer schwach befahrenen Nebenstrecke ergibt sich das in Bild 3 dargestellte Kostenverhältnis.

Während bei einer Ausrüstung der Strecke mit ETCS L2oS mit einer Kostensteigerung zu rechnen ist, kann sowohl im Betrieb mit ETCS L3 als auch im Modus ETCS AUT von einer Kostenreduktion ausgegangen werden. Durch die geringe Anzahl von Fahrzeugen fällt die Kostensteigerung bei der Fahrzeugausrüstung nicht so stark ins Gewicht wie die großen Einsparungen in der Ausrüstung der Infrastruktur. Auch ist durch die Umstellung auf einen automatisierten Betrieb nicht grundsätzlich von geringeren Kosten auszugehen; sowohl als ATO over ETCS L2 als auch als ATO over ETCS L3 ergeben sich keine signifikanten Kostenunterschiede zum manuellen Betrieb in den jeweiligen Modi. Dies ist vor allem dadurch begründet, dass neben den Personalkosten für den notwendigen Train Operator auch eine entsprechende Infrastruktur für die Fernsteuerung der Züge im Störfall geschaffen werden muss.

Die größten Einsparungen werden – unter den getroffenen Annahmen – mit dem autonomen Betrieb erzielt. Angesichts der geringen Fahrzeuganzahl für die Bedienung der Nebenstrecke können durch eine Verlagerung der kostenintensiven Sicherungs-

1.5 % of CapEx annually in cases where no ownership costs were available. The train operator (see section 2.4), who is needed as a manual fall-back level in the case of a failure, is an additional cost position for the automated scenarios.

We decided to evaluate the relative changes between the scenarios instead of the absolute costs due to the use of the multiple assumptions:

- GSM-R with radio data transmission capability and ETCS-components are needed from the ETCS L2oS scenario onwards.
- The train protection functionality increasingly shifts from the infrastructure to the vehicle. The costs therefore depend heavily on the ratio between the installed infrastructure components and the vehicles in need of equipment.
- The automated scenarios include no costs for engine drivers and signallers, but for train operators and their workstations instead. The train operator assumes the tasks of both the engine driver and signaller.
- The ETCS AUT scenario contains the highest levels of uncertainty, because we had to use multiple assumptions in our calculations (due to the lack of technical implementations). The decentralised train protection on and between trains shifts part of the financial burden to the operating company.

We have calculated the cost relations shown in fig. 3 for the examined case of a rural branch line.

The calculations show a slight increase in costs in the case of a complete ETCS L2oS installation. Both ETCS L3 and ETCS AUT, on the other hand, are estimated to enable cost-cutting over the entire life-cycle. This can mostly be explained by the small number of vehicles as opposed to the high infrastructure costs. Furthermore, automation in itself does not contribute a decisive cost reduction as can be seen by comparing the ATO over ETCS L2 and ATO over ETCS L3 scenarios with those using manual operations. The cost differences are marginal because a train operator and an associated working environment are needed to remotely control the trains in the case of a failure. Under the given assumptions, most savings will be generated under fully autonomous operations. Considering the small number of vehicles needed to service a branch line, shifting the cost-intensive signalling infrastructure onto the vehicles will lead to sig-

technik auf das Fahrzeug Kosten eingespart werden. Da in den Szenarien ein 30 Minuten-Takt angenommen wird, kann hiermit auch eine Alternative für ein attraktives Schienenverkehrsangebot im ländlichen Raum aufgezeigt werden.

2.4 Verhalten im Störfall

Als abschließendes Element der integrierten Bewertung werden auch Reaktionen auf Störungen untersucht. Nicht alle Störungssituationen können vorausgesagt werden. Es ist daher zu klären, wie auf Störungen reagiert werden kann, ohne die Verfügbarkeit des Systems stark zu verringern. Am DLR wurde eine Methode zur temporären manuellen Steuerung eines Zuges im Falle von Störungen der Automatik entwickelt, bei der der Bediener, „Train Operator“ genannt, an einem Remote-Arbeitsplatz sitzt und mithilfe von Kamera- und Sensordaten den Zug fernsteuert. Hierdurch müssen technische Störungsbehandlungen nicht alle Störungsszenarien vollständig abdecken, sondern können günstiger auf die häufigsten Störungen ausgelegt werden und in nicht abgedeckten Fällen die Steuerung an einen menschlichen Bediener abgeben. Für die Bewertung der technischen Machbarkeit und der psychologischen Auswirkungen dieser Methode ist eine Untersuchung der Mensch-Maschine-Interaktion essenziell. In [10] und [11] werden die durchgeführten Untersuchungen näher beschrieben.

Im Projekt „Next Generation Railway System“ [12] konnten die Module Betriebssimulation, Wirtschaftlichkeitsanalyse und der Train Operator in einem Demonstrator integriert werden, der für Versuche, zur Auswertung und zur Präsentation der Bewertungsmethodik dient. Dies ermöglicht eine simultane Untersuchung von unterschiedlichsten Betriebssituationen und die Evaluation von manuellen Eingriffen in der Echtzeitsimulation SUMO [13]. Somit steht dem DLR eine umfassende Softwarelösung zur Bearbeitung von technologischen und psychologischen Fragen zur Verfügung, die dabei helfen kann, Automatisierungspotenziale im Bahnbetrieb zu ergründen und zu bewerten.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die integrierte Bewertung zeigt Chancen und Grenzen der Automatisierung im Schienenverkehr. Mögliche Leistungssteigerungen hängen stark von der zugrundeliegenden Infrastruktur ab und eine Kostenreduktion durch die Automatisierung ist nicht selbstverständlich. Bei entsprechenden Randbedingungen (siehe Kapitel 2.2) und bei einer konsequenten Auslegung der Inf-

rastructure, können signifikante Kostenreduzierungen erreicht werden. Da wir in unseren Berechnungen eine halbstündliche Servicezeit in unseren Berechnungen, gilt dies auch für Fälle mit erhöhten Frequenzen für attraktive Schienenverkehrsleistungen in ländlichen Gebieten.

2.4 The conduct in the case of a failure

The last element in the integrated evaluation involves an examination of different reactions to failures. No conclusive solution has yet been found with regard to how automation should react to any failures which were unforeseen during development and are consequently not covered by the specific reaction patterns. The DLR has developed a methodology to reassess temporary manual train control, if the automation is disrupted. In this approach, a “train operator” is located at a remote workstation and can safely control the train using camera and sensor data. This allows rare failure modes to be omitted from the automation design, so that it can be designed to cover the most common failures more cheaply and to transfer the control to a human operator, if faced with situations beyond its abilities. The assessment of the technical feasibility and psychological ramifications of this approach requires the human-machine interaction to be studied thoroughly. The realised studies are described in detail in [10] and [11].

We have integrated the synchronous simulation, profitability analysis and train operator modules into a single evaluation and demonstration tool in the “Next Generation Railway System” project [12]. This can be used for experiments, for operational evaluations and to present the evaluation methodology to the public. This allows us to simultaneously examine different operational situations and possible manual interventions in the real-time SUMO simulation [13]. This extensive software solution has enabled the DLR to elaborate any technological and psychological issues which can help us to further understand and evaluate the potential of automation in railway operations.

3 Summary and outlook

The integrated evaluation has revealed the opportunities and limits of automation in railway traffic. Possible increases in performance or capacity are heavily dependent upon the underlying infrastructure and cost reductions based on automation cannot be taken for granted. However, cost reductions can be realised along with the mitigation of the staff shortage under the right circumstances and when consequently designing the infrastructure to meet the requirements of automated or auto-

WEGE IN DIE ZUKUNFT

Die BUG-Unternehmensgruppe bietet Ihnen „Alles aus einer Hand“

- Gleisbau
- Tiefbau
- Ingenieurbau
- Kommunikations- und Elektrotechnik
- Gerätevermietung und Logistik
- Verkehrsleittechnik
- Sicherheitsdienst und Bahnservice



rastruktur auf die Anforderungen eines automatisierten oder autonomen Zugbetriebs können aber durchaus Kosteneinsparungen bei gleichzeitiger Reduzierung des Personalbedarfs erzielt werden. Als Migrationsschritt hin zur Automatisierung bietet sich ETCS L3 an, da dort im Unterschied zur Infrastrukturausrüstung bei ETCS L2 auch auf die Gleisfreimeldung und, bei entsprechend präziser Ortung, auf einen Großteil der Balisen verzichtet werden kann. Gleichzeitig werden dort durch den potenziellen Einsatz von Moving-Block-Systemen die größten Leistungssteigerungen erzielt, die im Zusammenspiel mit einer Automatisierung voll ausgenutzt werden können.

Mit den vorliegenden Methoden zur integrierten Analyse von Automatisierungstechnologien und dank der Zusammenführung in einem Softwaretool können am DLR weitere Forschungen zur Automatisierung des Bahnbetriebs durchgeführt werden. Ziel ist eine multikriterielle Bewertung von Szenarien in Echtzeit, die den Vergleich unterschiedlicher Technologien und menschlicher Handlungen im Störfall erlaubt und die Versuchsabläufe direkt mit den resultierenden Leistungsfähigkeiten, Störbestehenszeiten und Kosten verknüpft. ■

mous train operations. ETCS L3 should be the focus when migrating to automated train operations instead of ETCS L2oS, as the initial cost reductions based on the reduction in infrastructure components can only be realised at this level. At the same time, ETCS L3 also allows for large performance increases due to the possibility of Moving Block operations, which automation can help to optimally utilise.

The developed methodologies for the integrated evaluation of automation technologies and the integration of these approaches in one software tool mean that the DLR can now conduct further research into the automation of railway operations. The next target is a multiple-criteria evaluation of the scenarios in real time which will enable us to compare the different technologies and the human failure rectification and directly link the trial runs to the resulting performances, failure persistence times and costs. ■

LITERATUR | LITERATURE

- [1] Intraplan Consult GmbH, „BVWP Verkehrsverflechtungsprognose 2030 (Zusammenfassung Los 3)“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, München, 2014
- [2] Bundesnetzagentur, „Marktuntersuchung Eisenbahnen 2018“, 2018 [Online]. Verfügbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Eisenbahnen/Unternehmen_Institutionen/Veroeffentlichungen/Marktuntersuchungen/marktuntersuchungen-node.html (letzter Zugriff am 25.03.2018)
- [3] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „Verkehr in Zahlen 2014/15“, 2015 [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/K/verkehr-in-zahlen.html> (letzter Zugriff am 25.03.2018)
- [4] Flamm, L.; Meirich, C.; Jäger, B.: „Die Umsetzung des automatisierten Bahnbetriebs zwischen Technik, Regelwerken und Wirtschaftlichkeit“, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, (68) 03/2018, pp. 27-31
- [5] Flamm, L.; Meirich, C.: „Next Generation Railway System III: MS23.1: Technologieszenarien des automatisierten Eisenbahnbetriebs“, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Braunschweig, 2018
- [6] Deutsche Bahn Netz AG, „European Train Control System (ETCS) bei der DB Netz AG“, 2014 [Online]. Verfügbar unter: https://fahrweg.dbnetze.com/resource/blob/1359298/d9556ec0c860abb53cf07bfc693f79d/etcsbroschuere_2014-data.pdf (letzter Zugriff am 25.03.2018)
- [7] Meirich, C.; Flamm, L.: „Urbane Mobilität: Digitale Bahnsysteme, MST R Analyse des Ist-Standes und der zu erwarteten Entwicklungen“, DLR, Braunschweig, 2018
- [8] Pachl, J.: Systemtechnik des Schienenverkehrs, 7. Auflage, Braunschweig: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013
- [9] Deutsche Bahn Netz AG, Konzernrichtlinie 808.0210A02, Kostenkennwertekatalog, 2011
- [10] Brandenburger, N.; Naumann, A.: „Enabling automatic train operation through human problem solving“, SIGNAL + DRAHT, 03/2018, pp. 6-13
- [11] Brandenburger, N.; Naumann, A.: „Towards remote supervision and recovery of automated railway systems: The staff's changing contribution to system resilience“, in Proceedings of the International Conference on Intelligent Rail Transportation, IEEE, 2018
- [12] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, „Next Generation Railway System“, 2019 [Online]. Verfügbar unter: <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/next-generation-railway-system> (letzter Zugriff am 25.03.2019)
- [13] Krajczewicz, D.; Erdmann, J.; Behrisch, M.; Bieker, L.: Recent development and applications of SUMO – Simulation of Urban MObility. International Journal On Advances in Systems and Measurements, 2012, 5. Jg., Nr. 3&4

AUTOREN | AUTHORS

Dipl.-Ing. Leander Flamm

wissenschaftlicher Mitarbeiter / *Research Associate*
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),
Institut für Verkehrssystemtechnik
Anschrift / *Address*: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig
E-Mail: Leander.Flamm@dlr.de

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Benedikt Scheier M. Sc.

wissenschaftlicher Mitarbeiter / *Research Associate*
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR),
Institut für Verkehrssystemtechnik
Anschrift / *Address*: Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig
E-Mail: Benedikt.Scheier@dlr.de